

## 2008年夏季昆明上空下平流层重力波统计特性

张灵杰<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国气象科学研究院,北京 100081;<sup>2</sup>温州市气象局,浙江温州 325027)

**摘要:**利用昆明探空站2008年夏季(6—8月)垂直高分辨率的L波段探空资料,分析了昆明上空下平流层(21~28 km)惯性重力波的统计特性。分析结果表明:垂直波长主要集中在3.5~4 km之间,平均值约为3.53 km;水平波长主要集中在250~1250 km之间,平均值约为714 km;平均水平波长与平均垂直波长之比约为200:1。固有频率主要集中在 $1f$ ~ $2.5f$ 之间,平均值约为 $1.7f$ ,相当于固有周期17 h左右。重力波能量在垂直方向上主要向上传播,其出现频率达到86%;水平传播方向主要为偏东、偏北、西南、偏南和东南5个方向。垂直固有波速主要集中在-0.1~0 m/s之间,平均值约为-0.06 m/s;水平固有波速主要集中在10~20 m/s之间,平均值约为14.5 m/s。

**关键词:**惯性重力波;下平流层;统计特性

中图分类号:P445

文献标志码:A

论文编号:2010-1691

### Statistics of Gravity Waves in the Lower Stratosphere over Kunming during Summer 2008

Zhang Lingjie<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

<sup>2</sup>Wenzhou Meteorological Bureau, Wenzhou 325027)

**Abstract:** The statistical characteristics of inertia gravity waves in the lower stratosphere (21–28 km) over Kunming were studied based on the high vertical resolution L-band radiosonde data in the summer (June to August) of 2008 from Kunming sounding station. The results showed that: The vertical wavelengths are mainly in the range of 3.5–4 km, with an average of about 3.53 km. The horizontal wavelengths were mainly distributed between 250–1250 km, with a mean value of about 714 km. The ratio of the mean horizontal to vertical wavelength was about 200:1. The intrinsic frequency was mainly concentrated in  $1f$ – $2.5f$ , with an average of about  $1.7f$ , equivalent to an intrinsic period of 17 hours or so. The gravity wave energies were mostly propagating upward in the vertical direction with an occurrence of 86%. The mean horizontal propagation directions of the gravity waves were mainly eastward, northward, southwestward, southward, and southeastward. The vertical intrinsic phase speed was dominated by -0.1–0 m/s, with a mean value of about -0.06 m/s. The horizontal intrinsic phase speed mainly ranged from 10–20 m/s, with a mean value of about 14.5 m/s.

**Key words:** inertia gravity waves; lower stratosphere; statistical characteristics

### 0 引言

一般认为,大多数在中层大气活动的重力波是由对流层内的气流过山、积云对流和急流锋面系统产生的<sup>[1-3]</sup>。这些重力波从对流层产生,而后向大气中层传播,从而引起水平动量的垂直输送。当波动在上传过程中由于饱和、破碎和弥散等过程会出现衰减,水平动量向基本气流输送,这就是重力波对基本气流的强迫

作用。因此,虽然重力波在对流层产生,但它们仍然可以影响到远离其激发源区的大气。上传的重力波通过重新分配动量和能量这种方式,使得对流层和上层大气之间相互耦合,并在形成中层大气环流中起关键作用<sup>[4-5]</sup>。

最近,卞建春等<sup>[6]</sup>利用北京观象台15个月垂直高分辨率探空资料分析了北京上空下平流层重力波的统

**作者简介:**张灵杰,男,1985年出生,浙江温岭人,硕士研究生,主要从事中尺度动力学及数值模拟研究。通信地址:325027浙江省温州市鹿城区横河南新村1号气象台(2)办公室, Tel: 0577-88320428, E-mail: zhang20031320025@163.com。

**收稿日期:**2010-06-03, **修回日期:**2010-12-16。

计特性。Zhang等<sup>[7]</sup>利用武汉区域气象中心提供的两年时间的无线电垂直高分辨率探空资料统计分析了武汉上空对流层和下平流层重力波的活动特征。吕洪方等<sup>[8]</sup>通过利用武汉大学瑞利散射激光雷达16个月的观测数据研究了武汉地区上空30~65 km高度范围的重力波的活动规律和统计特征。袁韦华等<sup>[9]</sup>利用北京市观象台2002年1—12月气球无线电探空观测资料中的温度变量研究了北京上空对流层和下平流层重力波谱统计特性。张灵杰等利用红原探空站的L波段探空资料对青藏高原上空下平流层重力波波动特征进行了分析研究。尽管这些工作分析得到了中国地区上空重力波活动的一些统计特征,但它们仅局限于北京、武汉和青藏高原这3个地区的研究,因此有必要进一步开展中国其他地区重力波活动特征的研究工作。

目前,国内对西南地区上空重力波的研究工作较少。由于受观测资料的限制,利用昆明探空站垂直高分辨率的L波段探空资料只初步研究2008年夏季昆明上空下平流层惯性重力波一些重要参数(如固有频率、垂直和水平波长、波传播方向等)的统计特征。

### 1 观测资料

使用资料是从昆明探空站(25°N, 102.7°E)观测得到的2008年夏季(6—8月)垂直高分辨率的L波段探空资料,昆明探空站的海拔高度为1889.3 m。探空站一般一天作两次常规观测,观测时次分别为07和19 LT,但在个别情况下进行01和13 LT的加密观测,有些时次存在缺测。在探空资料中,温度和气压每1~2 s有一个测量值,垂直高度根据温压曲线来确定,风速每分钟测量一次,并直接给出高度值。在使用温度和气压资料计算出垂直高度后,笔者仅分析温度和风速的观测资料。通常情况下,探空气球的上升速度约为5 m/s,因此温度的垂直分辨率约为10 m,风速的垂直分辨率约为300 m。为了便于计算,首先把在垂直高度上不等间隔分布的温度和风速原始资料进行垂直插值,间隔为50 m。对于高垂直分辨率的温度,采用线性插值,而对低垂直分辨率的风速则采用3次样条插值。

### 2 分析方法

理论分析和实际观测表明,沿垂直方向由重力波产生的水平扰动风矢量端点的轨迹在水平面上的投影大致表现为椭圆形状。这里,重力波主要指低频的惯性重力波。根据单色重力波的偏振关系,可以从矢量端点连线图上分析得到低频惯性重力波的特征参数,如固有频率、水平和垂直波长、相速度、水平和垂直传播方向等。

笔者使用的分析方法主要参考卞建春等<sup>[6]</sup>文中的方法,分析原理及具体分析步骤详见文献[6]。以下是根据水平风速和温度廓线提取重力波特征参数的具体步骤。

首先,采用4阶多项式拟合纬向风 $u$ 、经向风 $v$ 和温度 $T$ 的背景廓线。用第一节垂直插值得到的原始廓线减去背景廓线,得到扰动廓线。接着,对扰动廓线进行功率谱分析,确定重力波的垂直波长。由于扰动廓线中包含小尺度的或者由强切变引起的扰动分量,而这些噪音会影响到固有频率的估计<sup>[1]</sup>,因此,在椭圆拟合水平扰动风矢量端点连线图之前,需要对扰动廓线进行滤波。滤波窗口根据垂直波长的大小确定。主分量分析(PCA)原理表明椭圆拟合可以通过主分量分析来实现。如设 $A=\overline{u^2}$ ,  $B=\overline{v^2}$ ,  $C=\overline{uv}$ , 这里上划线表示高度平均,那么正定矩阵 $\begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$ 的2个特征值

( $\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0$ )为 $\lambda_{1,2} = \left[ A+B \pm \sqrt{(A-B)^2 + 4C^2} \right] / 2$ ,  $\lambda_1$ 与 $\lambda_2$ 分别为椭圆长轴和短轴半径的平方,对应的特征向量所指的方向为椭圆长轴和短轴的方向,也即第一、二主分量的方向。设 $u'_{//}$ 和 $v'_{\perp}$ 分别为水平扰动风沿椭圆长轴和短轴方向的分量。固有频率 $\omega$ 可根据关系

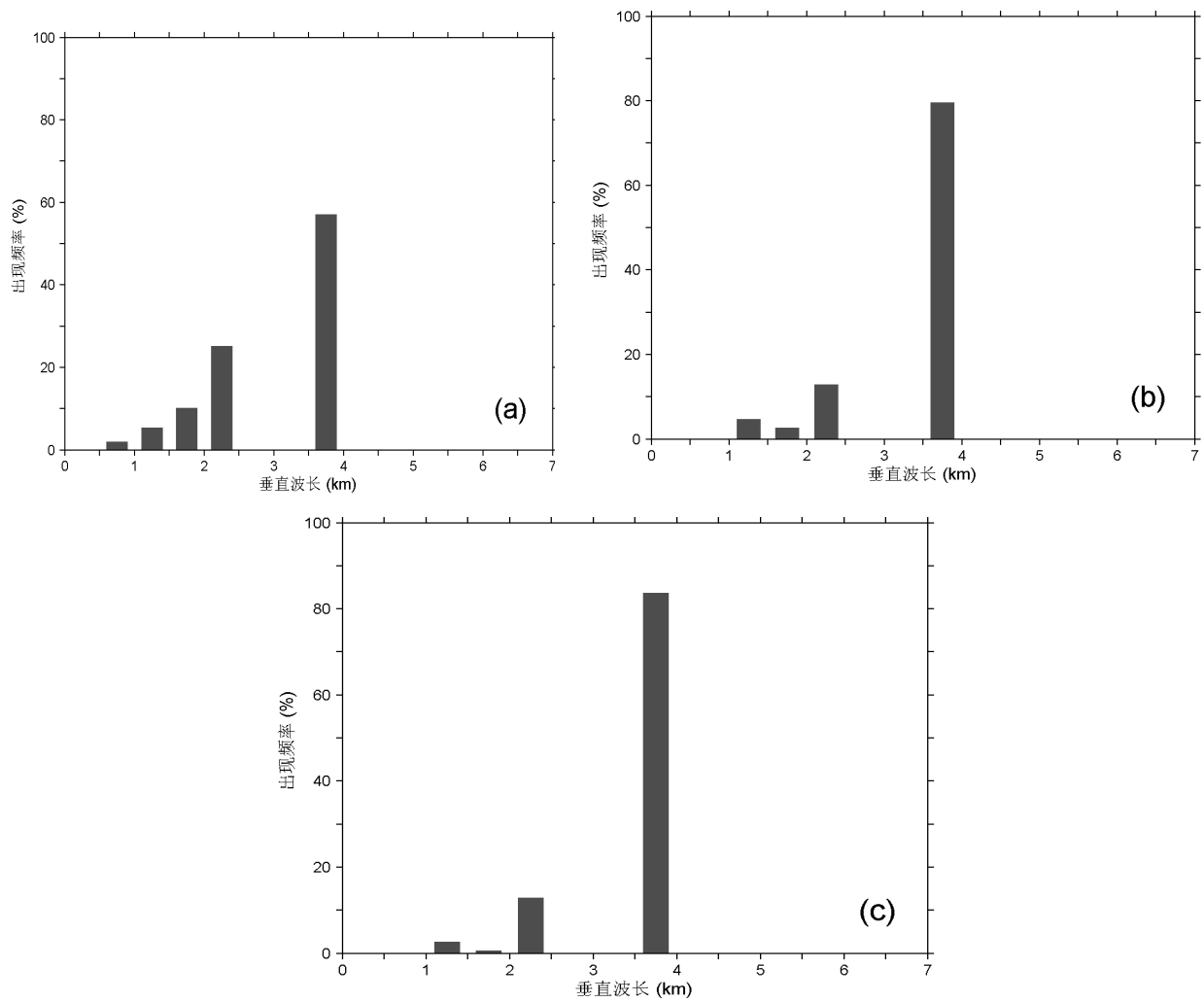
$\omega/|f| = (\lambda_1/\lambda_2)^{1/2}$ 计算得到。椭圆长轴方向的计算公式为 $\tan \alpha = \left[ B-A + \sqrt{(A-B)^2 + 4C^2} \right] / 2C$ ,  $\alpha$ 的取值范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ ,它表示重力波的水平传播方向,但存在 $180^\circ$ 的不确定性。这个不确定性可通过 $u'_{//}$ 与扰动温度 $T'$ 的关系来消除。如果 $\eta = \langle u'_{//} T' \rangle$ 为正,尖括号 $\langle \rangle$ 表示内积,则水平传播方向为 $\alpha+180^\circ$ ;反之,若 $\alpha \geq 0^\circ$ ,则水平传播方向为 $\alpha$ ,若 $\alpha < 0^\circ$ ,则水平传播方向为 $\alpha+360^\circ$ 。在北半球( $f > 0$ ),如果 $\gamma = \langle u'_{//} v'_{\perp z} \rangle$ 为负,则波能向上传播;反之,波能向下传播。南半球与北半球的结果相反。重力波的水平波长可通过线性频散关系

( $\omega^2 - f^2$ ) $\lambda_H^2 = N^2 \lambda_z^2$ 来估计,这里 $\lambda_H$ 和 $\lambda_z$ 分别表示重力波的水平波长和垂直波长,浮力频率平方 $N^2$ 的计算表达式为 $N^2 = \frac{g}{T_0} \left( \frac{dT_0}{dz} + \frac{g}{C_p} \right)$ ,式中 $T_0$ 为背景温度, $C_p$ 为干空气比定压热容。水平和垂直固有波速可分别由定义式

$c_{iH} = \frac{\omega \lambda_H}{2\pi}$ 和 $c_{iZ} = \frac{\omega \lambda_z}{2\pi}$ 计算得到。

**3 分析结果**

由温度的背景廓线可知,昆明上空对流层顶高度



(a)温度;(b)纬向风速;(c)经向风速

图1 垂直波长的频率分布

在2008年夏季达到了20 km左右。参照Allen等<sup>[10]</sup>的建议,笔者选取21~28 km高度范围作为下平流层重力波的分析范围。总共分析了147个时次的观测资料,占有所有资料的79%。

### 3.1 垂直波长

在对纬向风、经向风和温度的扰动廓线进行功率谱分析时,垂直波长取功率密度最大值所对应的波长,功率谱采用Burg法最大熵谱分析来估计。图1分别给出了根据温度(图1a)、纬向风速(图1b)和经向风速(图1c)扰动廓线确定的垂直波长的频率分布。可以看到,垂直波长主要集中在3.5~4 km之间,温度、纬向风速和经向风速的平均垂直波长均为3.53 km左右。

### 3.2 固有频率

根据上一节的分析得到,垂直波长主要集中在3.5~4 km之间,因此选择带通滤波器3~4.5 km滤波窗口,滤波器采用汉宁(Hanning)窗。图2给出了固有频率与科氏参数之比出现频率的分布,可以发现它们主

要集中在1~2.5之间,平均值约为1.7。相应地,固有频率的平均值约为 $1.7f$ ,相当于固有周期17 h左右。

### 3.3 水平波长

图3为水平波长的频率分布图。由图3可见,水平波长主要集中在250~1250 km之间,平均值为714 km左右。平均水平波长与平均垂直波长之比约为200:1,即在下平流层重力波几乎是沿水平方向传播的,垂直方向的分量较小,这与卞建春等<sup>[9]</sup>的结论是一致的。

### 3.4 传播方向

通过计算第二节中的 $\gamma$ 值可得,重力波能量在垂直方向上主要是向上传播的,其出现频率达到86%。

图4为重力波水平传播方向的频率分布图。图4中把4个象限分为12个方位角,每个方位角为30°,0°、90°、180°和270°分别表示东、北、西、南4个方向,内、中、外3圈分别表示10%、20%和30%的出现频率。从图4中可以看到,重力波的水平传播方向主要为偏东、偏北、西南、偏南和东南这5个方向。

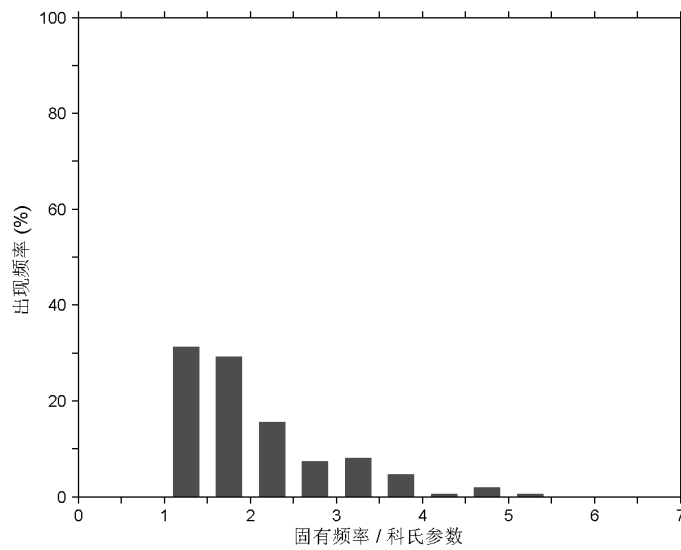


图2 固有频率与科氏参数之比的频率分布

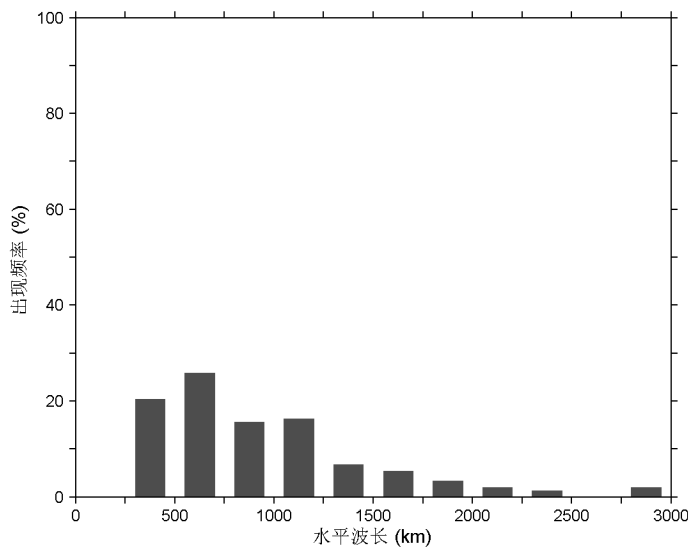


图3 水平波长的频率分布

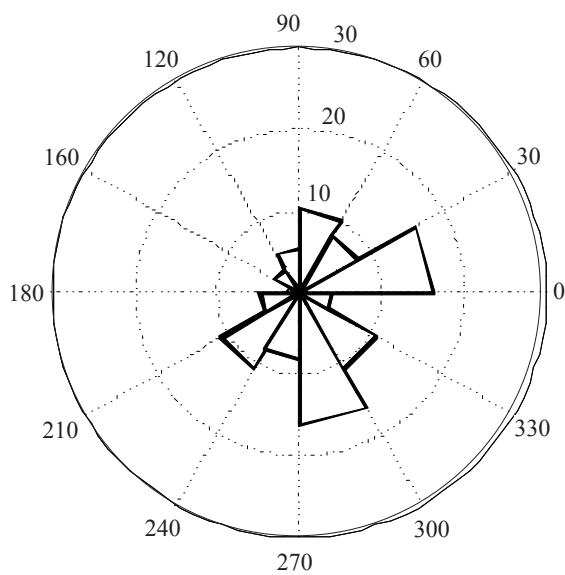


图4 水平传播方向的频率分布

### 3.5 固有波速

虽然下平流层重力波基本上沿水平方向传播,但在垂直方向上还是有一定的速度分量。重力波位相的垂直传播方向与能量的垂直传播方向相反,因此垂直固有波速的正负可由 $\gamma$ 值来确定。图5为垂直固有波速的频率分布图,垂直固有波速主要集中在-0.1~0 m/s之间,平均值约为-0.06 m/s(~-5 km/天)。

图6给出了水平固有波速的频率分布。由图6可见,水平固有波速主要集中在10~20 m/s之间,平均值约为14.5 m/s。

### 4 结论与讨论

利用昆明探空站2008年夏季(6—8月)垂直高分辨率的L波段探空资料,分析了昆明上空下平流层(21~28 km)惯性重力波的统计特性。分析结果表明:  
(1)垂直波长主要集中在3.5~4 km之间,平均值约为

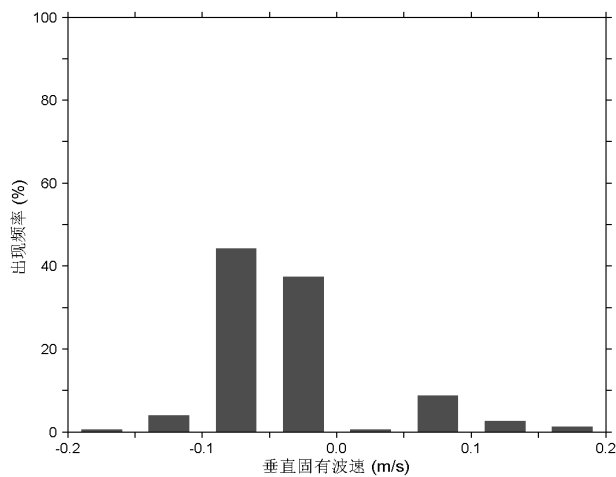


图5 垂直固有波速的频率分布

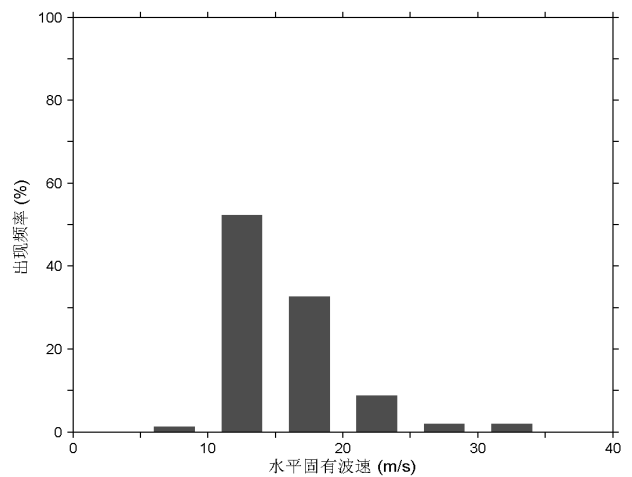


图6 水平固有波速的频率分布

3.53 km; 水平波长主要集中在 250~1250 km 之间, 平均值约为 714 km; 平均水平波长与平均垂直波长之比约为 200:1。(2)固有频率主要集中在  $1f \sim 2.5f$  之间, 平均值约为  $1.7f$ ; 相当于固有周期 17 h 左右。(3)重力波能量在垂直方向上主要向上传播, 其出现频率达到 86%; 水平传播方向主要为偏东、偏北、西南、偏南和东南这 5 个方向。(4)垂直固有波速主要集中在 -0.1~0 m/s 之间, 平均值约为 -0.06 m/s; 水平固有波速主要集中在 10~20 m/s 之间, 平均值约为 14.5 m/s。

该结论是建立在仅分析昆明站 2008 年夏季的 L 波段探空资料的基础上得到的, 并未对重力波活动的季节及年际变化特征作分析讨论, 这些工作有待于进一步的探讨和研究。

参考文献

[1] Fritts D C. Gravity wave sources, source variability and lower and middle atmosphere effect[M]//Coupling Processes in the Lower and Middle Atmosphere. Thrane E V, Blix T A, Fritts D C. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993:191-208.

[2] Piani C, Durran D, Alexander M J, et al. A numerical study of three-dimensional gravity waves triggered by deep tropical convection and their role in the dynamics of the QBO [J]. J. Atmos. Sci.,2000,57:3689-3702.

[3] Snively J B, Pasko V P. Breaking of thunderstorm-generated gravity waves as a source of short-period ducted waves at mesopause altitudes [J]. Geophys. Res. Lett.,2003,30(24):2254.

[4] Fritts D C, Alexander M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere [J]. Rev. Geophys.,2003,41:1003-1063.

[5] 吴少平,易帆.三维可压大气中重力波波包非线性传播的数值模拟[J].中国科学E辑,2002,32(2):176-183.

[6] 卞建春,陈洪滨,吕达仁.用垂直高分辨率探空资料分析北京上空下平流层重力波的统计特性[J].中国科学D辑,2004,34(8):748-756.

[7] Zhang S D, Yi F. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30°N, 114°E) China [J]. Ann. Geophys.,2005,23:665-673.

[8] 吕洪方,易帆.利用瑞利激光雷达和无线电探空仪观测数据对武汉上空重力波特性的研究[J].地球物理学报,2006,49(6):1682-1692.

[9] 袁韦华,徐寄遥,吴永富,等.北京上空对流层和下平流层重力波谱统计特性[J].中国科学D辑,2009,39(11):1505-1514.

[10] Allen S J, Vincent R A. Gravity waves activity in the lower atmosphere: seasonal and latitudinal variations [J]. J. Geophys. Res., 1995,100(D1):1327-1350.

致谢:感谢中国气象科学研究院大气科学信息部提供探空资料。